第 63卷 第 3期 天 文 学 报 Vol.63 No.3
2022年5月 ACTA ASTRONOMICA SINICA May., 2022
doi:

甚大面积伽马射线空间望远镜计划*

范一中[1,2,3†] 常 进[1,2,3,8‡] 郭建华[1,2,3] 袁 强[1,2,3] 胡一鸣[1,2]
李 翔[1,2,3] 岳 川[1,2] 黄光顺[4,5] 刘树彬[4,5] 封常青[4,5]
张云龙[4,5] 魏逸丰[4,5] 孙志宇[6] 余玉洪[6] 孔 洁[6] 赵承心[6]
藏京京[7] 蒋 维[1,2] 潘 旭[1,2,3] 韦家驹[1,2] 汪 慎[1,2] 段凯凯[1,2]
沈兆强[1,2] 夏子晴[1,2] 徐遵磊[1,2] 冯 磊[1,2,3] 黄晓渊[1,2,3]
蔡岳霖[1,2] 魏俊杰[1,3] 曾厚敦[1,2] 贺昊宁[1,2] 李 剑[3]
杨睿智[3] 颜景志[1,2,3] 张 毅[1,2,3] 吴雪峰[1,2,3] 韦大明[1,2,3]

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)
(2 中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210023)
(3 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)
(4 核探测与核电子学国家重点实验室 中国科学技术大学 合肥 230026)
(5 中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)
(6 中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)
(7 临沂大学物理与电子工程学院 临沂 276000)
(8 中国科学院国家天文台 北京 100049)

摘要 高能伽马射线探测是研究极端天体物理的主要途径之一.空间高能伽马射线探测具有覆盖波段宽、时间连续性好、能量分辨率高等突出优势.在成功研发并运行我国首颗天文卫星——“悟空”号的基础上,紫金山天文台联合国内的多家单位提议研制甚大面积伽马射线空间望远镜(Very Large Area gamma-ray Space Telescope;VLAST),该望远镜在GeV-TeV能段接受度高达10 $m^2\cdot$ sr,并具有强的MeV-GeV波段探测能力,其综合性能预期比费米卫星的大面积伽马望远镜(*Fermi* Large Area Telescope; *Fermi*-LAT)提升10倍之上.本文重点介绍VLAST的主要科学目标,探测器的初步配置及预期性能指标.

关键词 仪器: 探测器, 伽马射线: 综合, 辐射机制: 非热, 粒子天体物理

中图分类号: P144; **文献标识码**: A

2022-02-22收到原稿, 2022-03-05收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (U1831206、11921003) 及中国科学院科研仪器设备研制关键技术团队(GJJSTD20210009)资助

† yzfan@pmo.ac.cn

‡ chang@pmo.ac.cn

1 引言

宇宙中存在着大量的高能粒子加速源,例如吸积中的黑洞、快速旋转的磁化中子星、高速运动的伽马暴与超新星外流体、强烈的星系风、剧烈活动的恒星、暗物质的湮没与衰变等.这些加速出来的高能粒子又与周围的物质发生作用,产生宽波段的伽马射线辐射.例如对于高能电子,它们产生高能伽马射线的途径主要包括:磁场中的同步辐射、软光子场中的逆康普顿散射、介质中的轫致辐射.对于能量特别高的质子,其同步辐射尽管也能产生高能伽马射线,但辐射效率比电子低数个量级.一般认为,高能质子主要通过与周边介质的强子过程来产生伽马射线以及中微子辐射.暗物质是否湮没或者衰变尚无定论.如果它们真的湮没或者衰变,可以有两种途径来产生高能伽马射线.一种是直接湮没或衰变到伽马射线,或者是在湮没到夸克或轻子对后的次级瞬时伽马射线辐射,这类信号直接示踪暗物质的空间分布并且不依赖于外部环境,是基于伽马射线的暗物质间接探测的主要探测对象.第二种是湮没或衰变产生的电子宇宙射线与低能光子发生逆康普顿散射产生高能伽马射线.该信号一般分布范围较大,依赖于电子的传播过程和周围软光子的分布,在很大程度上抹去了暗物质分布的空间信息.

对高能伽马射线的探测一般有两种方案.一种是直接探测,由于大气的吸收以及强的本底,直接探测往往需要把探测器发送到大气层之外进行.另一种是地面的间接探测,主要是利用高能粒子在大气中的簇射信息来重建其种类、能量、方向等.对于地面间接探测设施而言,其工作能段一般较高,例如国际上下一代切伦科夫望远镜阵列(CTA)的探测阈值约为20 GeV, 其灵敏能段为100 GeV-20 TeV. 而空间的直接探测原则上可以做到全波段,但受限于探测器的面积,一般的光子探测上限是数TeV.

国际上首个有重要影响的高能伽马射线探测望远镜是高能伽马射线试验望远镜(EGRET),它是康普顿伽马射线天文台(Compton Gamma Ray Observatory, 缩写为CGRO)所搭载的4台主要观测仪器之一.CGRO是美国国家航空航天局(NASA)于1991年发射的一颗伽马射线天文卫星,重达17000 kg,以著名的美国物理学家康普顿的名字命名.EGRET的工作能段是20 MeV-30 GeV,具有极高的时间分辨本领.该仪器由美国宇航局戈达德空间飞行中心、马克斯 · 普朗克研究所和斯坦福大学共同开发.在运行期间,EGRET取得了一批重要的成果[1],例如:成功探测了一批蝎虎座BL天体的高能伽马射线辐射,并使伽马射线脉冲星的数量增加到8个,还探测到了若干个伽马射线暴的高能余辉辐射[2].

2000年迄今国际上工作在GeV伽马射线波段的天基设施主要是意大利伽马射线天文成像望远镜(Astrorivelatore Gamma a Immagini Leggero; AGILE)、美国*Fermi*-LAT与我国“悟空”号卫星.AGILE卫星是一个小型的伽马射线探测天文台, 其载荷重量仅约100 kg[3].基于其创新性设计,AGILE成功地实现了伽马射线波段 (30 MeV-30 GeV)与X射线的成像观测 (10 - 40 keV).其主探测器——伽马射线成像探测器(GRID)由三大部分组成,分别是硅-钨板径迹探测器、CsI量能器、以及反符合探测器.*Fermi*卫星于2008年发射升空,它是一个大型的观测装置,重达3000 kg,上面搭载了伽马射线暴探测器(Gamma-ray Burst Monitor;GBM)与LAT[4].GBM能覆盖约70%的天区,主要进行伽马射线暴的监测;LAT的工作能段为20 MeV-300 GeV,与AGILE的GRID相似,它主要由反符合探测器、硅-钨径迹探测器、CsI量能器三大部分构成.*Fermi*-LAT的探测器表面积达

到了1.5m×1.5m,有效接受度达到了$\sim 2\ \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{sr}$,是目前国际上最强大的GeV-TeV光子的空间探测设施[4].从探测器的配置来看,AGILE就是一个简化版的*Fermi*-LAT,其探测器配置也是当今高能伽马射线探测的标准.其中的硅-钨径迹探测器将高能光子转换为正负电子对,从而测量其入射方向.*Fermi*-LAT与GRID对硅-钨径迹探测器予以了精心设计,可提供高的角分辨能力,这对于伽马射线天文研究意义重大.AGILE及*Fermi*卫星在空间伽马射线探测方面取得了系列重大科学发现,包括: AGILE合作组发现了"通常认为的高能标准流量源Crab星云"的GeV闪耀[5] 并被*Fermi*-LAT证实; AGILE合作组及*Fermi*-LAT合作组还发现超新星遗迹在$\sim$ 60 MeV的能谱截止现象,被认为是加速质子的直接证据[6–7];发现了系列新伽马射线辐射现象,例如银河系中心方向上的GeV超出[8–9]、银心的GeV泡[10] 、微类星体、球状星团、大质量X射线双星、河外毫秒脉冲星等的GeV辐射[11–12]、与IceCube高能中微子成协的活动星系核耀发TXS 0506 [13].值得一提的是,银心GeV超出的能谱以及空间分布都可以用$\sim 50-100$ GeV的暗物质粒子湮没到底夸克对来合理的解释,更让人鼓舞的是在AMS-02的反质子数据中也可能存在着对应的超出,可被自洽的解释为暗物质湮没信号[14–15],因此银心的GeV超出现象受到了粒子物理界和天文学界的高度关注,成为近年的研究热点.此外,*Fermi*-GBM 也取得了引人瞩目的成就,发现了与首例双中子星并合事件GW170817成协的伽马射线暴GRB 170817A [16]. *Fermi*卫星对短暴GRB 090510的 MeV-GeV 观测还对量子引力效应给予了强的限制 [61].

我国在高能伽马射线方面的空间探测方向上起步较晚.上个世纪末,紫金山天文台开始进行高能电子宇宙射线与伽马射线的空间探测方法研究.2011年底由紫金山天文台提出的暗物质粒子探测卫星(DAMPE)被正式列入中国科学院战略先导专项空间科学专项.该卫星共有四个子探测器[18],即塑闪阵列探测器、硅-钨径迹探测器、BGO量能器、中子探测器.2015年12月17日暗物质粒子探测卫星顺利升空,并被命名为"悟空"号."悟空"号以测量高能宇宙射线见长[19–21],也具有高能伽马射线探测能力,但与*Fermi*-LAT相比接受度小了约10倍,这制约了其在伽马射线天文方面的潜力.尽管如此,得益于优异的能量分辨本领,其在线谱的搜寻方面具有较强优势.基于前5 yr的观测数据,"悟空"号获得了与*Fermi*-LAT相当(暗物质湮没情形)甚至更强(暗物质衰变情形)的限制[22]. "悟空"号的研发、运行和分析研究经验[18, 23–38]为成功研制新一代大型伽马射线探测卫星奠定了坚实的基础.考虑到高能伽马射线天文领域的蓬勃发展前景,紫金山天文台联合国内的一些单位建议研制甚大面积伽马射线空间望远镜(VLAST).本文将介绍VLAST的主要科学目标、初步的探测器配置及初期性能指标.

2 主要科学目标

2.1 暗物质粒子间接探测

从宇宙学到亚星系尺度的大量天文观测都表明宇宙中存在为数众多的暗物质,其总质量比构成星体和介质的普通物质质量高出约5倍,占宇宙总能量份额的约1/4.主流的理论认为暗物质是一种或者多种超出标准模型的新粒子,它们质量较大且相互作用微弱,这一理论可以自然地解释暗物质的产生、丰度以及其结构分布.基于这一理论模型,人们提议了三种探测手段来探测暗物质粒子:直接探测暗物质和普通物质的碰撞,通过高能粒子对撞机产生暗物质,以及通过宇宙线、伽马射线、中微子等观测间接探测暗物质.除了这

种弱相互作用大质量粒子,理论上还有多种多样的暗物质候选粒子,例如惰性中微子、轴子、超轻玻色暗物质等.作为下一代旗舰型空间伽马射线天文台,VLAST具有大接收度和高能量分辨率等特点,有望在多种形式的暗物质粒子间接探测中取得非常重要的突破.

2.1.1 暗物质线谱搜寻

暗物质可能会湮没或衰变到$\gamma\gamma$、γZ^0等末态,进而产生单能的伽马射线线谱[39].考虑到在GeV以上的能区,天体物理过程产生的伽马射线能谱通常为连续谱,发现一条线谱将预示着某种来自于暗物质或新物理的未知过程.在过去的十几年中,诸多研究已利用*Fermi*-LAT数据在银河系中心、星系团和矮星系等天体中搜寻过线谱,并曾报道过一些疑似的线谱信号[40–41],但这些结果有的被发现可能来自系统误差,有的置信度仍不足以确证其真实性,可以说目前尚未确凿地发现GeV以上能区的线谱信号[42]. "悟空"号卫星也对全天的线谱做了盲搜,并同样得到了零结果[22].线谱信号探测的灵敏度取决于两个关键因素:能量分辨率和统计量.VLAST在这两个方面会显著强于以往的实验,因此将大大提高线谱搜寻的灵敏度,可以检验*Fermi*-LAT数据中呈现出的疑似信号,并有望首次发现单能伽马射线线谱.

2.1.2 银河系暗物质信号搜寻

银河系中心由于距离地球较近,且预期具有较高密度的暗物质分布,一直是备受关注的暗物质间接探测目标区域.自*Fermi*卫星升空以来多个研究组对*Fermi*-LAT数据的分析表明:银河系中心可能有一个近似球对称的GeV能段连续能谱超出,其空间分布和能谱形状可以用质量为数十GeV的暗物质湮没来解释,湮没截面正好和标准的热产生暗物质模型所预期的一致[8–9].考虑到该伽马射线超出与随后发现的AMS-02 的反质子超出可以用相近的暗物质参数描述[14–15],银心GeV伽马射线超出成为非常引人注目的暗物质疑似信号.但是一些研究表明该超出的能谱与空间分布也可以用大量的毫秒脉冲星来描述,这些毫秒脉冲星由于流量低于*Fermi*-LAT卫星的灵敏度而被误判为弥散辐射[43–44].受限于*Fermi*-LAT卫星的统计量,目前还无法在暗物质解释和毫秒脉冲星解释中做出合理的判断.进一步的研究银心GeV超出的空间与能谱分布,以及在银心附近寻找暗弱的毫秒脉冲星将是VLAST的关键科学目标之一,将对该超出的物理本质提供关键证据.银河系晕中的暗物质粒子湮没或衰变也将产生弥散伽马辐射,特别是如果存在大量的暗物质子结构的话其湮没产生的伽马辐射将会很可观.VLAST也将通过对弥散伽马射线的能谱和空间分布的精确测量来探测银河系晕中的潜在暗物质信号.

2.1.3 矮椭球星系暗物质信号搜寻

矮椭球星系的特征是其中的恒星和气体物质稀少,总质量由其中的暗物质主导.现有的动力学测量表明,对于一些矮椭球星系,其中暗物质的质量可高达恒星与气体质量的成千上万倍.对于处于高银纬的矮椭球星系而言,考虑到其中的黑洞、中子星数量少,一般不会产生很强的伽马射线,因此一旦探测到伽马射线辐射,就可能来于暗物质湮没.在*Fermi*-LAT的数据中目前没有探测到明确的来自矮椭球星系的伽马射线辐射信号[45],在个别矮椭球星系中观测到了微弱的超出,尚不能确定是否是统计涨落[46–47].*Fermi*-LAT对一些矮椭球星系方向的观测已经在较宽的参数空间中排除了暗物质粒子以热产生的截面湮没到夸克或轻子对的可能性[48].不过这些限制依赖于矮椭球星系中暗物质的总质量与空间分布,因此还存在一定的不确定性[49].VLAST更高的灵敏度将可以探测到更弱

的伽马源,有可能首次发现矮椭球星系中的伽马射线辐射并研究其是否来自于暗物质湮没或衰变.

2.1.4 轴子类轴子粒子暗物质信号搜寻

轴子是粒子物理中被提出来解决强相互作用的电荷-宇称难题(也就是著名的强CP问题)的一种新基本粒子.研究发现它也很好地符合暗物质的主要特性,因此轴子及其推广的类轴子粒子也是一类引人瞩目的暗物质候选粒子.在电磁场中,轴子和类轴子可以与光子发生相互转化.根据这一特性,我们可以通过搜寻伽马射线源的能谱中可能存在的光子-类轴子振荡特征结构来间接探测轴子和类轴子粒子.伽马射线观测在搜寻轴子和类轴子信号方面具有的独到优势,可以和其他探测方式互补.相较于直接探测轴子(类轴子)的地面实验,在某些特定的质量区域上,利用伽马射线观测开展的间接探测研究已经被证实可以达到更高的探测灵敏度[50].特别是,对于neV质量范围的类轴子,*Fermi*-LAT对活动星系核NGC 1275的伽马射线观测对光子-类轴子耦合常数给出了目前最强的限制结果[51].另外,在*Fermi*-LAT对一些河内明亮的超新星遗迹[52]和脉冲星[53]的观测中,还找到了一些疑似的光子-类轴子振荡结构,然而拟合数据给出的类轴子参数空间和现有的太阳轴子望远镜实验结果冲突,意味着这些“振荡”结构可能源自于未知的系统误差.间接探测轴子和类轴子也是VLAST的关键科学目标之一.VLAST超高的能量分辨率使其在类轴子振荡特征结构的搜寻中具有显著的优势.

2.2 高能时域天文

2.2.1 活动星系核(AGN)

在*Fermi*-LAT探测到的所有银河系外的高能伽马射线源中,活动星系核占据了绝大多数(见*Fermi*-LAT 12年源表4FGL-DR3[54]).一般认为活动星系核的非热X射线辐射来自于同步辐射和/或逆康普顿散射,而高能伽马射线辐射来自于逆康普顿过程,尤其是超大质量黑洞吸积盘上的光学紫外光子所导致的外逆康普顿过程,但也有人提出质子的同步辐射模型,还有少数专家认为是强子起源[55].由于很多活动星系核的红移高于1,因此对于地面切伦科夫望远镜最灵敏的100GeV以上区间而言,在传播过程中的背景吸收已经非常显著,因此空间的MeV-TeV伽马射线探测在全面揭示活动星系核的辐射机制、测定宇宙的伽马射线视界面、测量星系际磁场方面(后两者见第2.4节)发挥着重要的作用,VLAST将在这方面大有可为.

2.2.2 伽马射线暴(GRB)

伽马射线暴的主要起源包括大质量恒星的死亡与中子星双星系统的并合,极少部分也来自于恒星被大质量黑洞潮汐瓦解[56].伽马射线暴的瞬时辐射通常集中在keV-MeV波段.部分伽马暴具有GeV辐射甚至TeV辐射,而且该辐射的持续时标要比瞬时辐射长很多[57].一般认为,伽马射线暴的瞬时辐射是来自于电子的同步辐射或者是康普顿化后的热辐射,而GeV-TeV辐射来自于逆康普顿过程.尽管伽马射线暴是暂现源,观测时段短,但是亮度很高,其GeV辐射也可以用来研究高红移处宇宙的伽马射线视界面.考虑到VLAST的MeV-TeV宽波段同时观测,有望对一些亮暴的能谱演化予以连续刻画,解释其中的物理过程.注意到尽管VLAST对于MeV辐射本身的定位精度有限,但是GeV-TeV的精确定位将有效地引导地面小视场望远镜的跟踪观测.

2.2.3 毫秒脉冲星(MSP)

毫秒脉冲星通常被定义为有着30毫秒以内自转周期的脉冲星.主流的观点认为它们是来自于吸积伴星物质获得角动量从而快速自转的年老中子星.球状星团中有着相当数量的毫秒脉冲星,而星团内稠密的恒星是吸积物质的最佳来源地,因此球状星团中的大量毫秒脉冲星的发现为吸积起源理论提供了观测证据.毫秒脉冲星有着明显的射电和伽马射线辐射,在*Fermi*-LAT第四期源表中已有187个被证认为毫秒脉冲星[58].他们的能谱峰值常在几个GeV的能段[59],使得在这个能段上它们成为除AGN之外伽马射线天空非常重要的一类源.毫秒脉冲星有着极好的稳定性,可以用来进行高精度计时.除了可以揭示其周围的环境(如伴星)外,还可以用来探索例如低频引力波等基础物理前沿领域.相对复杂的星周环境一定程度上阻碍了射电的探测.与*Fermi*-LAT相比VLAST具有更大的接受度,可望发现更多的伽马射线毫秒脉冲星.

2.2.4 X射线双星

X射线双星是由致密星(黑洞和中子星)和恒星组成的双星系统,是银河系内数量众多的一类高能辐射源.其中,X射线双星中的伽马射线双星和伽马射线微类星体具有伽马射线辐射[60].伽马射线双星由大质量OB恒星和致密星组成,目前共探测到8个,其中有3个的致密星被认证为脉冲星.微类星体是具有稳定或暂现喷流的吸积X射线双星,目前总体样本约15-20个.微类星体的伽马射线辐射来自致密星体附近[61]或者更远距离上喷流与周围星际介质的相互作用[62–63]. 由于双星的轨道运动、喷流的周期性进动或暂现,伽马射线双星系统及微类星体的伽马射线流量存在时间演化,为研究双星系统中粒子加速以及高能辐射机制提供了理想的天体物理实验室[64].由于目前伽马射线双星和微类星体的样本数量很小,发现新的样本从而研究其高能辐射的统一起源一直是这个领域最为关心的事.伽马射线双星和微类星体多分布在银盘上,然而*Fermi*-LAT的空间分辨率、灵敏度、以及复杂的银道面弥漫背景也阻碍了对它们的搜索.未来VLAST具有更宽的能段和更好的空间分辨率,将有益于找到更多的伽马射线双星和伽马射线微类星体.

2.2.5 星风碰撞双星(CWB)

星风碰撞双星是由OB或Wolf-Rayet大质量恒星组成的双星系统,恒星强大的辐射压驱动着$\sim 1000-2000$ km s^{-1}的星风,使星风碰撞双星的质量损失率达到了$10^{-8}-10^{-3}\ M_\odot\cdot$ yr^{-1}.星风碰撞在双星轨道内形成激波,对粒子进行加速从而产生多波段辐射.目前已经探测到来自星风碰撞双星中的射电和X射线波段同步辐射[65–66],同时也预期星风碰撞双星可以通过逆康普顿散射产生伽马射线辐射[67].然而迄今为止,只有Eta Carina和WR11被探测到具有伽马射线辐射[68–69].星风碰撞双星是研究双星系统中伽马射线辐射的重要一环,对理解双星中粒子加速机制有着重要意义.未来VLAST的高灵敏度有望在伽马射线波段发现更多的星风碰撞双星,促进其伽马射线辐射机制的研究.

2.2.6 新星、超新星、软伽马射线重复暴、黑洞潮汐撕裂恒星事件等爆发现象

新星是由吸积在白矮星表面的氢被白矮星高温加热造成的剧烈核子爆炸现象.*Fermi*-LAT的观测表明新星也是银河系内的重要伽马射线源,对于进一步揭示新星爆发的相关物理过程起到了重要的推动作用,VLAST预期将探测到更多新星的辐射,并更清楚地解析一些亮的新星高能辐射的时变及能谱特征.超新星的遗迹已经被广泛认为可以加速高能宇宙线.可以预期在超新星爆发的早期也应该存在激波和粒子加速的过程,这在物理

上和新星爆发类似.特别是如果超新星附近存在致密物质团块的话,超新星也将是伽马射线源.通过*Fermi*-LAT的观测数据,研究人员发现个别可能和超新星成协的伽马射线暂现源[70–71].它们和超新星之间的具体联系,特别是其光变行为等还需要更加精确的观测来进一步澄清.VLAST将在证认伽马射线超新星及其早期粒子加速过程的研究中发挥重要作用. 软伽马射线重复暴(SGR)是强磁化中子星产生的一类软伽马射线爆发现象,它们也有可能是高能伽马射线辐射源[72],但目前尚未探测到.借助于VLAST的高灵敏度,有望实现对一些巨型SGR耀发的高能伽马射线辐射的探测.黑洞潮汐撕裂恒星事件(TDE)一般只产生亚相对论性喷流,但Sw1644+57等少数事例也产生了相对论性喷流[73],其磁场能量耗散产生了明亮的伽马暴(当时被称为GRB 110328A).这样的事例可能伴随着GeV辐射,VLAST的高灵敏度观测有望发现该辐射成分.

2.3 宇宙线物理

宇宙线在物质场中的运动可产生高能伽马射线,主要的辐射机制包括非弹性强相互作用产生中性π介子衰变、正负电子和背景辐射场的逆康普顿散射以及正负电子在物质中的韧致辐射.伽马射线的观测对于寻找宇宙线加速源,研究宇宙线的传播和相互作用过程非常重要.尤为关键的是伽马射线沿直线传播,有效传播距离长,可以探测不同空间位置处的宇宙线分布特征,从而显著不同于带电粒子测量.伽马射线可以给我们提供全局的关于宇宙线的知识,有力地促进对宇宙线相关问题的理解.

2.3.1 超新星遗迹

超新星遗迹被普遍认为是银河系内最主要的宇宙线加速源[74],主要的原因是在银河系中平均每隔100年将有几次超新星爆发,爆发释放的激波动能平均约为10^{51}尔格,如果能量转换为宇宙线能量的效率达到10%,超新星遗迹产生的能量恰好和维持观测到的宇宙线流量所需的能量相当.通过扩散激波加速机制,超新星遗迹产生的激波可以将粒子加速到相对论性能量.观测到的来自超新星遗迹的射电、X射线和伽马射线波段的辐射是超新星遗迹加速粒子到相对论性能量的有力证据.近些年来,*Fermi*-LAT空间卫星在伽马射线波段的观测成为了探测来自超新星遗迹GeV辐射的有力手段,已有超过30个超新星遗迹被认证[75].*Fermi*-LAT对超新星遗迹IC 443以及W44的观测发现了强子辐射的直接证据[76],这一重大发现强烈地支持了超新星遗迹作为宇宙线的加速起源的假说.目前,超新星遗迹中所涉及的高能粒子加速、辐射、逃逸等物理过程仍然存在着很多的不确定性.VLAST可以覆盖MeV-TeV非常宽的能段,且具有很高的灵敏度和能量分辨率,可以更好地测量超新星遗迹能谱中的强子起源特征,确定能谱的拐折位置等[77],回答随时间演化的高能粒子加速和辐射等重要问题.

2.3.2 脉冲星风云

脉冲星绝大部分的自转能损转化为了相对论性的脉冲星星风,而脉冲星星风与超新星抛射物质或星际介质相遇后会产生激波,形成一个充满正负电子的脉冲星风云区域.脉冲星风云具有多波段辐射,是银河系内主要的伽马射线源.一般认为脉冲星风云的低能段辐射来自磁场中正负电子的同步辐射,而高能辐射来自正负电子的逆康普顿散射.最近,LHAASO在100 TeV以上探测到12个超高能伽马射线源[78],其中多个在位置上与脉冲星成协,有可能是脉冲星风云系统.同时,LHAASO也探测到来自Crab脉冲星风云的PeV

光子[79],这些结果为脉冲星风云加速宇宙线提供了新的可能支持[80–81].VLAST的高灵敏度和宽能段覆盖可以有效区分不同理论模型,为检验脉冲星风云是否是宇宙线源提供有效支持.

2.3.3 年轻巨星团

大质量恒星由于其高速的星风和可观的质量损失持续向星际空间注入大量动能,因此也被认为是可能的宇宙线加速源[82].另一方面,大质量恒星在银河系中以星协或星团的形式成团分布.最近的伽马射线观测也在一系列的大质量星团附近发现了显著的伽马射线辐射[83–84]. 尤其有趣的是,在一系列的年轻巨星团中,结合伽马射线和气体分布的观测,Aharonian等[84]发现宇宙线在这些结构中的空间分布可以统一地由$1/r$形式描述,从而表明这些宇宙线是由年轻巨星团在其长达百万年的寿命中持续注入的.值得注意的是,由于大质量恒星大部分分布在银盘上, 上文提到的伽马射线辐射区域中不仅包含年轻巨星团,也有可能的脉冲星风云和超新星遗迹的贡献.因此,VLAST对这些区域更高能量分辨率和更大统计量的观测,对于理解这些区域伽马射线的辐射机制以及相应的宇宙线加速与注入、传播机制尤其重要.另一方面,由于灵敏度的提升,VLAST也有望在银盘上的弥散伽马射线辐射中证认出更多此类伽马射线源.

2.3.4 银河系中心

银心附近区域包含有超大质量黑洞、超新星遗迹,脉冲星风云等天体以及预期存在的大量暗物质等,这使得人们对银心的研究兴趣长久不衰,银心也成为天文学家最为关注的天体实验室之一.2016年,H.E.S.S.通过观测银心附近的弥散伽马射线辐射,发现银心存在持续的宇宙线加速现象,且可以将宇宙线加速到PeV能量,该加速源很可能和银心的超大质量黑洞的活动有关[85].近期有工作利用*Fermi*-LAT数据在低能区证认出该加速源,而且发现中心分子云扮演着一个壁垒的角色,有效的阻止了宇宙线“海”中的高能粒子穿入该区域[86].未来VLAST对银心的进一步研究将能探索中心黑洞的活动与宇宙线加速,以及宇宙线与周围环境的相互作用,也将对前文2.1.2中所述银心GeV超出的天体物理背景的构建提供重要知识.

2.3.5 费米气泡

费米气泡(*Fermi* Bubble)是*Fermi*-LAT卫星在银心方向发现的延展伽马射线结构[10],其尺度达到了数千平方度.与更低能段的WMAP haze结构[87]、eRosita bubble结构[88]在空间分布上有一定的相似性.这些结构均被认为与银心区域的能量注入有关,但具体物理机制尚不明确.例如,这些非热辐射是由强子过程还是轻子过程产生?驱动这些结构的能量是由银河系中心超大质量黑洞的活动还是由恒星形成过程注入?这些基本问题都亟待回答.VLAST凭借其高灵敏度有望对费米气泡区域进行更深入的观测(特别是对GeV以下和100 GeV以上能区的能谱测量),对费米气泡可能的子结构进行解析,并得到费米气泡与银心区域的联系的信息.此外,得益于VLAST的高灵敏度,我们也将在邻近星系中搜寻类似的伽马射线辐射现象.

2.3.6 银河弥散背景

宇宙线在加速源附近以及在银河系星际空间中传播时会和物质以及辐射场相互作用产生弥散伽马射线.因此弥散伽马射线辐射是宇宙线在银河系内的分布以及传播过程的有力探针.从早期的OSO-3、COS-B、EGRET到今天的*Fermi*-LAT都对全天弥散伽马

辐射给出了测量,基于这些测量人们可以建立起一个较为完善的宇宙线传播和相互作用模型来解释弥散伽马射线和本地宇宙线的观测结果[89].然而,更为细致的研究发现宇宙线的空间分布和简单的传播模型预期并不完全相符,例如在外银河系区域宇宙线密度梯度比模型预期的更平[90],通过伽马射线得到的银河宇宙线流量和能谱指数随空间位置的变化也和模型预期不尽相同[91],在银盘区域数GeV以上存在弥散伽马射线超出[89]等.这些结果意味着宇宙线传播模型需要改进.通过VLAST对河内弥散伽马射线在更宽能段的精确测量结果,我们可以更好地限制宇宙线的传播模型.

2.3.7 近邻星系及星暴星系

星暴星系是恒星形成率很高且富含气体的星系.高恒星形成率对应着高超新星形成率及伽马暴产生率,超新星与伽马暴可以加速宇宙线[92];同时,大量大质量恒星产生的超级风或超级泡中的大尺度终端激波也可以加速宇宙线[82].高能端的宇宙线可能逃逸出星暴星系,传播至地球被观测到.PAO团组通过分析极高能宇宙射线与候选源的空间成协性得到,近邻的星暴星系贡献了约9.7%的极高能宇宙线(能量高于39 EeV),而四个近邻的星暴星系(NGC4945、NGC253、M83及NGC 1068)贡献了约90%的各向异性流量[93]. 低能端的宇宙线会有部分在逃逸出星暴星系之前便与星系中的致密气体发生反应,产生次级光子及中微子.目前,*Fermi*-LAT望远镜探测到了来自M82、NGC 253、NGC 4945、NGC 1068等近邻星暴星系的100 MeV-100 GeV光子[94],VERETAS望远镜观测到来自M82的能量高于TeV的光子[95],H.E.S.S.望远镜探测到了来自NGC 253的100 GeV-10 TeV能段的光子[96].和银河系类似,普通星系中的超新星遗迹和脉冲星风云等也可以加速宇宙线从而辐射伽马射线.*Fermi*-LAT探测到了包括M31、大小麦哲伦云等数个近邻星系[97–98].然而大多数普通星系由于其伽马射线光度太低而不能被观测到.未来VLAST对更多的近邻星系和星暴星系的观测将可以研究这些星系里的宇宙线分布、传播和相互作用特性以及和银河系的对比等很有趣的科学问题.

2.3.8 星系团

星系团中心的大质量黑洞产生的相对论性喷流或星系团外围的大尺度激波可以加速宇宙线到极高能量[99].被加速的宇宙线在星系团中传播时与星系团中的物质及光子发生反应,可以产生高能伽马光子和中微子,这部分高能光子与星系团在空间上成协,可能被VLAST观测到.另外,部分宇宙线可以逃逸出星系团在宇宙中传播,并在传播过程中与河外背景光子和微波背景辐射光子发生反应,产生高能伽马光子和中微子,可能贡献到河外弥散伽马背景中[100].VLAST对星系团的观测将可以研究星系团的粒子加速过程, 限制宇宙射线在星系团中传播的能损效率,对河外弥散伽马背景的观测也可以限制星系团对极高能宇宙线的贡献.

2.4 宇宙物理学

2.4.1 河外伽马射线背景

河外伽马射线辐射主要来自于活动星系核、恒星形成星系和伽马射线暴.目前,探测到单类源的最大样本是被称为耀变体的一类活动星系核,超过3700个[105].河外弥散伽马背景是指除去已探测到的点源和银河系伽马射线前景所剩余的河外伽马射线.它是各向同性的辐射,一般认为其来自那些不够亮从而不能被单独探测到的河外源的累积,所以主

要的贡献者通常被认为是耀变体.然而,它的确切组成仍不清楚,例如伽马射线流量低、数量巨大的星暴星系也可能主导全部的河外弥散伽马背景[106].一小部分河外伽马背景也可能来自暗物质粒子的湮没或衰变[107].VLAST的高灵敏度将有助于揭示河外伽马射线背景的辐射起源.

2.4.2 伽马射线视界

伽马射线视界是指高能伽马射线在传播过程中与河外背景光相互作用转化为正负电子对所造成的一种吸收效应.该效应使得来自某一距离(光深为1)之外的一定能量之上的伽马射线流量急剧下降.它反映了宇宙对高能伽马射线光子的不透明程度.从紫外/光学到远红外的河外背景光依赖于宇宙演化历史上的星系和恒星形成过程,因此这种不透明度是红移的函数.例如位于红移0.034的源Mkn 501的伽马射线能谱在10 TeV附近截止.而当红移为3时,截止能量已经降至约50 GeV.一般情况下,可以利用现有的EBL模型[108–109]和耀变体的伽马光子能量上限来估计伽马射线视界;也有工作发展了独立于河外背景光模型来估计宇宙伽马射线视界的方法[110].此外,*Fermi*-LAT利用在不同宇宙学距离上测量的伽马射线平均光深来限制了河外背景光的能谱和演化[111].拥有更高灵敏度和能量分辨率的VLAST可以更好地提供一个伽马射线视界随红移变化的映射,限制EBL吸收的截止能量和红移演化.

2.4.3 宇宙学参数测量

上一节中我们指出光深是一个红移的函数,一些宇宙学参数如哈勃常数和宇宙学密度,在光深的计算中起着重要的作用.因此在不同红移处光深的测量可以反过来对宇宙学参数做出重要的限制.基于一些河外背景光(Extragalactic background lights; EBL)模型[108–109]和在红移0-3范围光深测量结果[111],*Fermi*-LAT合作组首次使用伽马吸收效应来限制了哈勃常数和宇宙学密度[112].一些研究也使用现有耀变体的宇宙红移分布和河外弥散的伽马射线背景,假设伽马射线背景的截止能量起源于河外背景光吸收,从而限制了宇宙学参数[113].VLAST的高灵敏度、大统计量数据将显著促进此方面的研究.

2.4.4 星系际磁场

星系际磁场的大小是很难测量的.目前,类星体射电信号的法拉第自转测量、超高能宇宙线指向Cen A的到达方向的模拟等研究表明星系际磁场弱于10^{-8} Gauss.如前所述,高能源所辐射出的 TeV 光子在传播过程中会与河外背景光子相互作用产生正负电子对,而这些高能正负电子对会进一步通过逆康普顿散射把宇宙微波背景光子散射到GeV波段,该过程被称为TeV源的次级或级联辐射.级联辐射过程中,因受到星系际磁场影响,正负电子将会发生偏转,因此通过观测高能点源的级联辐射,伽马射线天文学提供了一种测量星系际磁场的新方法[114–117].基于该方法,一些研究通过*Fermi*卫星给出的GeV流量上限获得了星系际磁场的下限[117–119],大约10^{-15} Gauss,其大小依赖于我们假设的偏转角度.高灵敏度的VLAST应该可以给出更严格的下限或者直接测定星系际磁场的值.

2.5 基本物理规律检验

广义相对论和量子力学是现代物理学的两大支柱.许多量子引力理论已被提出用来尝试统一描述引力与量子物理.为庆祝Science创刊125周年,该杂志社公布了125个全球最具挑战性的科学前沿问题,其中“物理定律能否统一”被列为第五大科学问题.量子引力

理论预言相对论的基本假设(如洛伦兹不变性、弱等效原理)需要被打破,从而可能产生一些可以用实际观测来检验的物理效应,比如真空色散效应、真空双折射效应等等[101].发生在宇宙学距离的高能爆发天体为我们提供了检验这些物理效应的最佳实验平台.探索新物理、检验物理学基本原理和假设已成为国际各个高能天文设备的重要科学目标之一.

2.5.1　洛伦兹不变性检验

洛伦兹不变性是爱因斯坦狭义相对论的基本假定.当理论物理学家试图统一量子力学和广义相对论时,他们发现该假设可能需要打破,即所谓的洛伦兹不变性破缺.洛伦兹不变性破缺会导致真空色散效应,即光子在真空中的传播速度不再是常数c,而是跟光子的能量有关.由于伽马暴的能谱时延很短、光子能量很高且发生在宇宙学距离上,它们被认为是检验洛伦兹不变性破缺的最理想探针[102].得益于*Fermi*卫星探测到的伽马暴高能辐射(GeV光子),*Fermi*卫星科学组对洛伦兹不变性破缺作出了严格限制[61].该工作一发表就受到了国际同行的广泛关注,是利用新窗口观测资料取得重要原创性成果的一个成功典范.未来VLAST有望在GeV-TeV能段上刻画出更加精细的伽马暴高能光变曲线,我们可以得到更为精确的能谱时延,进而可对洛伦兹不变性破缺作出更严格的限制.

2.5.2　引力波速度测量及等效原理检验

首例双中子星并合引力波事件GW170817及其电磁对应体的成功探测[103–104],使人类研究宇宙同一天体的信息载体从电磁波延伸到了引力波,标志着天文学研究进一步进入多信使时代.致密天体引力波源及其电磁对应体可作为最佳实验室检验基础物理规律.爱因斯坦广义相对论预言引力波的传播速度和光速一致,因此通过测量引力波及其电磁对应体的到达时间差,人们就可以限制引力波的传播速度,进而检验广义相对论.此外,弱等效原理是爱因斯坦广义相对论和其它引力理论的重要支柱.基于Shapiro时间延迟效应,弱等效原理可以通过对比河外暂现源同时释放的不同信使粒子(光子、中微子甚至引力波),在穿越同一引力场所用的时间差来检验.未来VLAST参与引力波探测器的协同观测,有望探测到更多的引力波和伽马暴成协事件.借助这些成协事件,我们可以开展更高精度的引力波速度限制和弱等效原理检验.

3　探测器初步配置

整个VLAST有效载荷分为两部分:探测器部分和触发数据获取部分.根据物理设计,VLAST的有效载荷组成见图1,VLAST的探测器从顶部到底部包括:反符合探测器(Anti Coincidence Detector; ACD)、径迹及低能伽马探测器 (Silicon Tracker and low Energy gamma-ray Detector; STED)、高能成像量能器(High Energy Imaging Calorimeter; HEIC).

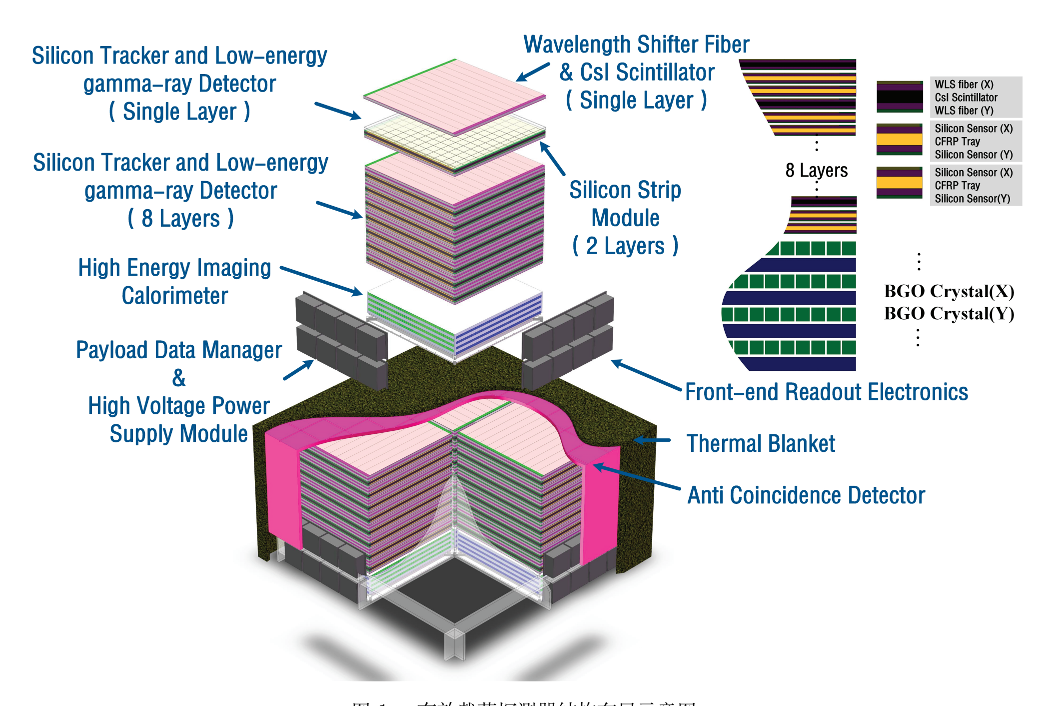


图 1 有效载荷探测器结构布局示意图.

Fig. 1 The schematic plot of the payload of VLAST.

3.1 反符合探测器(ACD)

VLAST需要反符合探测器来区分带电粒子和伽马光子,通过对入射带电粒子的高探测效率的测量与径迹的重构实现对电子和伽马光子的鉴别.同时,VLAST的反符合探测器也将通过带电粒子在探测器中的能损,实现轻核素的种类鉴别.如图1所示,VLAST的反符合探测器位于顶部和四周(侧面),为了减少伽马的次级反冲粒子击中反符合探测器造成误判,同时避免大面积造成的击中多重性,反符合探测器需要具备一定的位置测量能力.VLAST将反符合探测器设计成块状堆叠.根据物理目标要求,反符合探测器主要技术指标有:

a)探测单元块颗粒度:$< 1000\ \mathrm{cm}^2$;

b)探测单元动态范围:电子,离子($Z = 1 \sim 8$);

c)探测效率:好于99.97%;

d)提供带电粒子的触发击中信号,击中信号最小可触发阈值0.1 MIPs (最小电离粒子),阈值可调;

e)能够对10 $\mathrm{kHz/m^2}$的入射粒子进行处理,内部有科学数据的缓冲降低死时间.

反符合探测器拟采用块状的有机塑料闪烁体作为探测器的灵敏材料组成[18, 23–25].如图1所示,反符合探测器由顶部和四侧的块状探测灵敏单元组成“方形无沿帽子”的总体构型方案, 其中顶部反符合探测器的有效探测面积为3.1 m×3.1 m,四侧每面的有效探测面积为3.1 m×0.6 m.为了实现其主用功能,采用了模块化构型设计,组成的灵敏单元模块的主要尺寸约为0.3 m×0.3 m.为了实现灵敏面积无死区的设计需求,相邻单元模块间

需通过一定的结构交叠或增加如塑料闪烁光纤等灵敏探测器.我们的初步的结构方案中,反符合探测器由碳纤维加强蜂窝板组合成方型帽状主承力结构,探测单元模块交叠布置在主承力结构顶部及四周,通过碳纤维条状盖板结构分层分区压紧到主承力结构上,将其和主承力结构机械安装到一起构成整体.

为了保证信号读出幅度与粒子击中位置无关,反符合探测器的每个塑闪单元读出采用预埋波长位移光纤.同时,为了实现带电粒子/伽马高可靠度地区分和不同轻核素的测量,拟通过PMT双打拿极读出方式结合电荷测量ASIC芯片的设计方案实现大的动态范围覆盖、高集成性和高灵敏度等需求.此外,为了提高空间伽马的有效测量,所有的探测单元的信号读出通道还将参与有效载荷的总触发.整个反符合探测器共包括209个探测单元,由于读出光电倍增管拟采用双打拿极读出方式,并实现1:1的信号备份,因此共有418个PMT,418路触发信号测量通道和836路电荷测量通道.前端电子学FEE负责探测器信号的采集和处理,并生成触发判选系统(位于载荷数管中)所需要的击中信号.

3.2 径迹及低能伽马探测器 (STED)

高能($\sim$ 30 MeV及以上)伽马光子在VLAST中转换为正负电子,通过正负电子的径迹探测实现原初光子的方向探测.径迹及低能伽马探测器位于整个探测器有效载荷的第2层,主要功能为:实现对高能伽马射线-电子对的转换,并通过电子对的径迹测量,实现对伽马光子高角分辨的观测;实现低能光子的能量和方向测量. 硅微条是径迹探测的首选灵敏材料.VLAST为了兼顾低能($\sim$ 1 MeV)伽马光子的探测,在硅微条探测层之间设计了碘化铯(CsI)探测层,CsI用波长位移光纤读出用于测量低能光子的能量和方向,同时CsI晶体也充当高能伽马-正负电子对转换体.VLAST的设计中,将一个CsI探测层和2个硅微条探测大层(一个大层由X、Y方向的单面硅微条构成)形成一个“超层”,多个这样的超层构成了“径迹及低能伽马探测器”.显然,VLAST的“径迹及低能伽马探测器”与“悟空”号的硅径迹探测器[18, 23, 26]相比在功能及结构方面都有重大创新,其主要技术指标为:

a) 探测器层数:8大超层(每个超层包括CsI探测层和两个硅微条探测大层,一个硅微条大层有XY两小层);

b) 每层有效探测面积:不小于2.8 m$\times$ 2.8 m;

c) 探测能段:1 MeV$-$100 MeV(结合高能成像量能器);

d) 空间分辨$<$ 0.1°(@50GeV);

e) 提供击中信息给触发逻辑用于触发判选;

f) 探测器内部有科学数据的缓冲,死时间小于50μs.

径迹及低能伽马探测器的结构如图1所示,考虑到灵敏面积为2.8 m$\times$2.8 m,整个探测器由4个完全相同的探测阵列按2$\times$2紧密组合在一起,单个探测阵列的灵敏面积为1.4 m$\times$1.4 m.每个探测阵列都由8个探测超层构成,超层内部的探测器层由碳纤维+铝蜂窝板形成的结构支撑. 径迹及低能伽马探测器的CsI、硅微条和各种结构材料一起实现高能伽马光子到正负电子对的转换,硅微条负责转换后正负电子径迹的测量.对于低能伽马光子(MeV),它在径迹及低能伽马探测器中会产生康普顿散射,CsI负责发生康普顿散射的光子的能量测量和方向测量.

CsI对应的波长位移光纤采用多阳极的光电倍增管MPMT或者多通道的硅光电倍增器SiPM进行光电转换,然后送到前端电子学中进行采集.硅微条探测层基于单面硅微

条探测技术,由于每个硅微条芯片的面积为0.1 m×0.1 m,所以为了形成大面积的探测层,VLAST的硅微条探测层采用如下布局:由7个硅微条芯片相连(芯片上对应的微条键合连接在一起)形成一个硅微条模组(Ladder),两个模组头对头粘接在碳纤维结构上形成一个0.1 m×1.4 m的探测条,14个这样的探测条就可以拼成一个1.4 m×1.4 m的探测层.硅微条探测层的每个模组的信号由前端混合板FEH负责读出.所有FEH板最终由分布在4个侧面的前端读出板TRB进行数据采集、控制和供电.

3.3 高能成像量能器(HEIC)

与“悟空”号类似,为了对光子能量进行测量,VLAST需要高能量分辨率的成像电磁量能器[18, 23, 27–28].成像电磁量能器在测量粒子沉积能量的同时,能够高颗粒度地对高能粒子簇射进行成像.它将根据强子簇射和电磁簇射在量能器中的横向展开和纵向发展的不同进行粒子鉴别,从而实现对强子和光子(电子)的区分.高能成像量能器的主要技术指标如下:

a)每层有效探测面积:不小于2.4 m×2.4 m;

b)动态范围:0.1 GeV−20 TeV(电子和伽马光子);

c)能量分辨率:能量分辨率优于2%(@50 GeV);

d)强子抑制能力优于10^4(@50 GeV);

e)探测单元最小可触发阈值:<0.5 MIPs;

f)存储能力要求:量能器内部有科学数据的缓冲,死时间小于50 μs.

对于高能成像量能器,计划采用两种技术路线开展研究:长晶体方案及小晶体方案.最终在工程立项阶段选择最优的方案进行探测器研制. 长晶体方案类似“悟空”号卫星的量能器设计:利用单根长尺寸的BGO晶体,堆栈成一个立方体,其中每两层晶体的排布方向相互正交,可以实现对簇射形状的测量[18].“悟空”号的晶体尺寸为600×25×25 mm^3,结合光电倍增管的多打拿极读出,完成大动态范围的信号测量.VLAST实验需要高能成像量能器面积可以达到2.4 m×2.4 m,计划生产米量级(约1.2 m)的晶体,采用4个(2×2)量能器组合形成2.4 m的尺寸.目前,项目组的合作单位正尝试生长米量级BGO晶体.

VLAST高能成像量能器的另一种方案为小晶体方案.该方案用小尺寸闪烁晶体作为灵敏单元,晶体直接与半导体光电器件进行耦合,比如硅光电倍增(SiPM)、雪崩光二极管(APD)或光二极管(PD),进行荧光收集,电子学系统则直接集成在光电器件的下方. 该方案的优势是能达到较小的颗粒度,实现精细的3D成像能力.

4 探测器预期性能

根据科学目标的要求,VLAST探测器需要实现对GeV-TeV高能伽马射线的高灵敏度精确测量,同时具有一定的MeV伽马射线探测能力.为了验证和评估VLAST探测器的探测性能,我们针对性地开发了一套基于GEANT4[120]的探测器模拟软件,集成了探测器几何建模、灵敏单元的定义、入射粒子源的定义、物理模型的选择、粒子与探测器相互作用过程的精细模拟、探测单元响应信号的读出以及模拟数据数字化等功能.基于模拟数据,我们初步研究开发了针对康普顿散射和电子对效应两种不同类型伽马光子事例的重建算法,基于VLAST子探测器的探测信号对伽马光子事例进行准确甄别并有效重建出入

射事例的径迹和能量,对VLAST的接受度(几何因子)、有效面积、角度分辨、能量分辨等性能进行了初步分析.

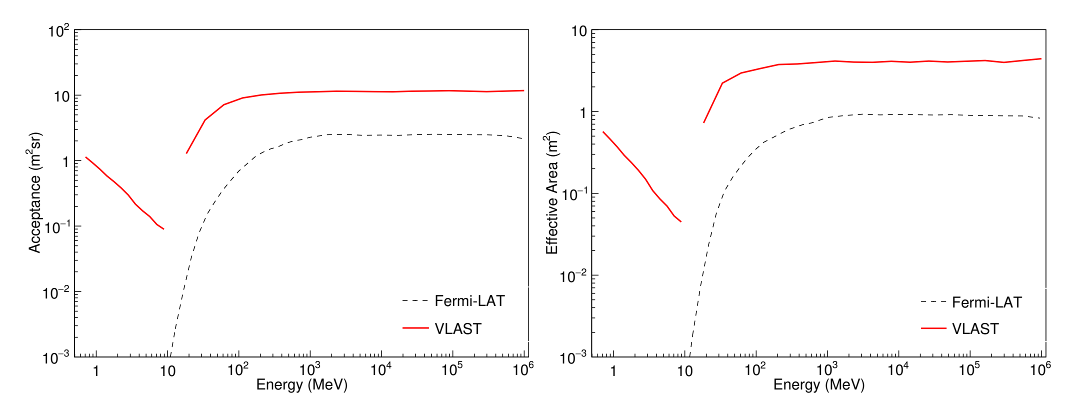


图 2　初步模拟得到的接受度(左图)和正入射有效面积(右图)随入射能量的变化,低能段曲线对应康普顿散射事例,高能段曲线对应电子对效应事例,*Fermi*-LAT对应数据版本为P8R3_SOURCE_V3 (https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Pass8_usage.html).

Fig. 2　Preliminary results of acceptance/geometry factor (left) and normal-incident effective area (right) versus energy. The solid red curve at low energies denotes Compton event reconstruction and the one at energies above 10 MeV represents pair event reconstruction. Dashed gray curve is for *Fermi*-LAT P8R3_SOURCE_V3 events (https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Pass8_usage.html).

4.1　接受度和有效面积

图2给出了VLAST探测器对伽马射线的接受度(左)和正入射有效面积(右)随入射能量的变化.左右两段曲线分别对应低能区康普顿散射事例和高能区电子对效应事例.VLAST的有效接受度最高约为12 $\mathrm{m^2 \cdot sr}$,正入射有效面积最高约为4 $\mathrm{m^2}$.与*Fermi*-LAT相比,VLAST在GeV以上能区的接受度和有效面积大了约5倍.同时,VLAST在MeV能区的有效面积达到约0.5 $\mathrm{m^2}$,相比之前的COMPTEL望远镜[121]($\sim 10-50\ \mathrm{cm^2}$)高出了两至三个数量级.

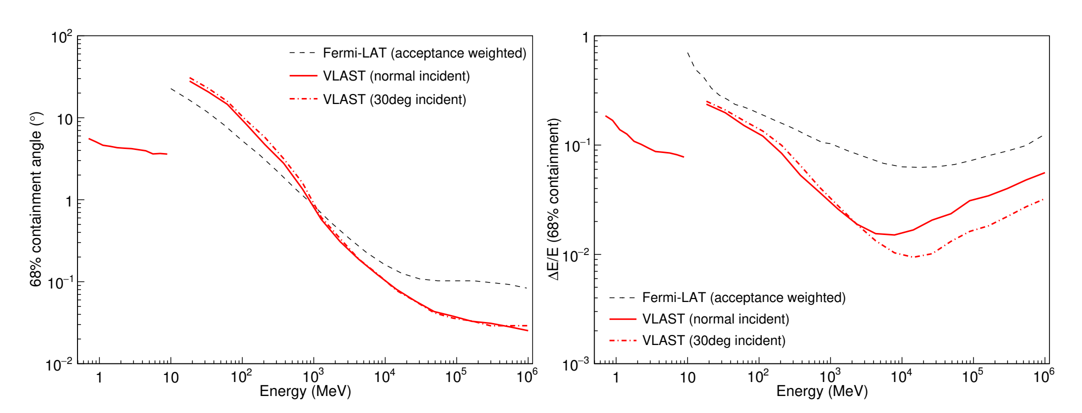


图 3 初步模拟得到的68%角度分辨(左图)和68%能量分辨(右图)随入射能量的变化,低能段曲线对应康普顿散射事例,高能段曲线对应电子对效应事例,*Fermi*-LAT对应数据版本为P8R3_SOURCE_V3 (https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Pass8_usage.html).

Fig. 3 Preliminary results of angular resolution (left) and energy resolution (right) as shown by the 68% containment versus energy. The solid red curve at low energies denotes Compton event reconstruction and the one at energies above 10 MeV represents pair event reconstruction. Dashed gray curve is for *Fermi*-LAT P8R3_SOURCE_V3 events (https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Pass8_usage.html).

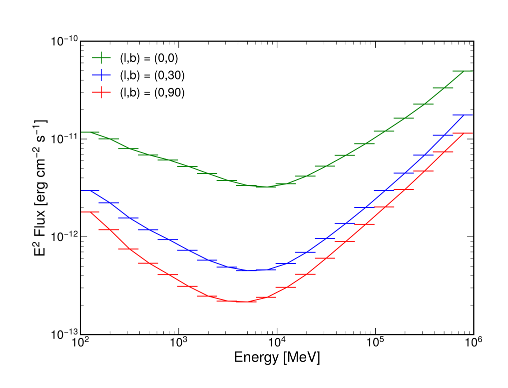
4.2 角度分辨和能量分辨

图3给出了VLAST探测器对光子的68%角度分辨(左)和68%能量分辨(右)随入射能量的变化.左右两段曲线分别对应低能区康普顿散射事例和高能电子对效应事例.对于康普顿散射光子事例,角度偏差定义为入射方向和重建康普顿方向环之间的最小角度差距.对于高能区电子对效应光子事例,VLAST的角度分辨与*Fermi*-LAT相当,能量分辨则要显著优于*Fermi*-LAT.考虑到VLAST的几何因子显著高于*Fermi*-LAT,VLAST对GeV以上能区伽马射线的探测灵敏度将大幅领先于*Fermi*-LAT.对于低能区康普顿光子事例,VLAST的角度分辨率约为$3° - 6°$,能量分辨率约为$8\% - 20\%$,可以实现对MeV伽马射线的有效探测.

4.3 观测灵敏度

在常规巡天观测模式下,只考虑伽马射线弥散背景,包括银河系内弥散辐射和河外各向同性辐射,通过在轨模拟可以评估得到VLAST运行5 yr对银心、中银纬和北银极方向的预期观测灵敏度,如图 4(左)所示.对于天空中特定点源(爆发源),VLAST探测器具备很高的角分辨率(优于0.1°@50 GeV),可以独立认证点源的方向和延展轮廓,进而对其能谱和光变给出精确测量,并配合其他探测实验进行多波段、多信使观测.

暗物质湮没可能产生特征伽马射线线谱,不同能量分辨率会将线谱进行不同程度的展宽,对探测灵敏度产生影响.VLAST探测器具备很高的能量分辨率(约2%@50 GeV),可以对暗物质湮没或衰变可能产生的伽马射线线谱进行高灵敏度探测.梁云峰等[41]以及沈兆强等[122]对16个邻近星系团的*Fermi*-LAT伽马射线数据进行了系统的研究,在~43 GeV发现了微弱的线谱迹象.如果不是来自于仪器的系统误差或者统计涨落,则VLAST观测2 yr将会可靠地发现这一信号(模拟得到的预期观测结果见图 4(右)).



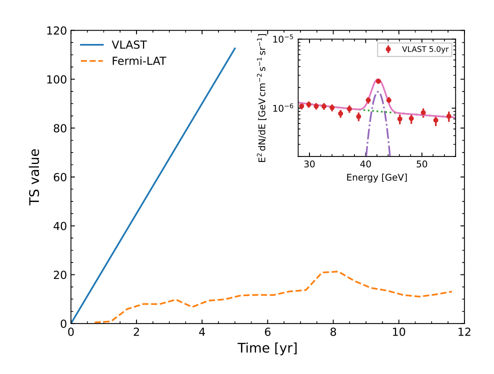


图 4 VLAST运行5 yr对银心、中银纬和北银极方向的预期观测灵敏度(左图)和对16个邻近星系团线谱辐射的预期观测结果(右图,假设沈兆强等[122]所报道的疑似线谱信号为真).

Fig. 4 Left: expected sensitivities of VLAST observation in different galactic regions in 5 years. Right:expected observation result of the 16 nearby galaxy clusters in 5 years, supposing that the weak tentative line signal found in Shen et al.[122] is intrinsic.

4.4 探测器的可能优化

前面介绍的是主探测器的设置情况,未来我们可能会根据科学产出最大化的原则予以进一步的优化或增加.例如,为了避免亮的伽马暴爆发时的电子学饱和所导致的大量数据丢失尤其是高能段的数据丢失,我们将考虑特别的触发设置,并将探测非常亮的MeV爆发现象的任务交给大视场伽马暴监视器这样的小型辅助探测器.此外,尽管我们的核心探测目标是伽马射线,但VLAST具有宇宙射线探测方面的巨大潜力.如果运载能力有富余,我们将考虑在(2×2阵列)高能成像量能器器的下方的中央增设一个1.2 m×1.2 m×0.2 m的量能器探测单元(其重量约为1800 kg).这个探测单元与高能成像量能器组成了一个特殊的“炼丹炉”构型,与“反符合探测器”和“径迹与低能伽马探测器”共同实现对电子、质子等宇宙线的大视场、高角分辨、(较)高能量分辨探测,将VLAST变成一个强大的伽马射线与宇宙线综合性空间天文台.

5 结束语

Fermi-LAT 2008年升空至今已在轨运行逾13年,从2019年开始已经不能进行定点观测,目前工作在巡天模式.目前美国尚未正式立项比*Fermi*-LAT更大的空间伽马射线望远镜的计划,正在推进的一个中等规模的全天中能伽马射线观测台(AMEGO)项目,探测能段是0.2 MeV-10 GeV, 但在GeV波段其有效探测面积仅有1000cm^{2}左右[123],显著地小于*Fermi*-LAT.另外美国即将进行气球实验的一个方案(先进粒子天文探索者APT,计划发射到深空轨道),是采用薄的CsI晶体+闪烁光纤读出的量能器方案来探测MeV-TeV的辐射[124].这个方案的一个特点是探测器有效面积大,和我们提议的VLAST相当,但APT的能量分辨和角分辨本领都较差[124],例如其在TeV能区的能量分辨仅为30%.中国科学院高能物理研究所与意大利佩鲁贾大学等单位正在提议进行中国空间站宇宙高能辐射探测实验(HERD)[125],计划于2027年开始运行.一旦顺利实施,HERD采用的多面读出方式在高能宇宙线的直接测量方面将显著扩大其接受度,成为该领域的引领者;但其伽马射线探

测能力相对*Fermi*-LAT并不占优,尤其是对于低地球轨道,多面读出对于伽马射线探测帮助有限.

国际上目前尚无立项建设*Fermi*-LAT接任者的计划,2030年前后国际上很可能面临GeV-TeV能区空间伽马射线高灵敏度探测的空窗期,而地面大型切伦科夫望远镜的间接探测在100GeV以下能区能力受限.考虑到伽马射线时域天文蓬勃发展的需要以及伽马射线是暗物质间接探测最直接的方式之一,我们提出了甚大面积伽马射线空间望远镜(VLAST)计划,并已于2022年3月初向中国科学院国家空间科学中心正式提出"背景型号"项目建议, 本文的主要内容也是该建议书的重要组成部分. VLAST的主要科学目标包括寻找"弱相互作用的大质量粒子"与"类轴子"等暗物质候选粒子存在的证据,监测引力波、中微子、黑洞潮汐瓦解恒星、相对论性激波冲出等天文事件的伽马射线辐射,发现高红移(>6)宇宙中的GeV爆发事件(目前的记录是红移为4.72的一个活动星系核[126])、精确测量宇宙的伽马射线视界,揭示河外背景辐射起源、研究第一代恒星,高精度地测量银河系弥散伽马射线辐射,获得宇宙线三维空间分布、揭示"费米泡"起源、在亚GeV能段证认宇宙射线源,长期监测变化天体的MeV-TeV辐射、观测伽马射线暴等高能爆发事件、发现新型高能辐射现象.

VLAST卫星计划运行在距离地面500 km约$20^\circ - 30^\circ$倾角的轨道上. 根据现有的技术储备,如果得到支持,可望在2029年之前完成VLAST卫星的研制任务. 一旦VLAST研制成功并顺利运行,将确立我国在高能伽马射线空间探测领域的领导者地位,成为国际上多信使天文学观测网络的关键一环,并带来暗物质、高能天体物理、宇宙线物理等研究领域的突破性进展.

致谢　本文的部分撰写得到了中国科学院上海天文台周佳能博士的协助.我们也感谢审稿人的详细修改意见和编委的建议.

参 考 文 献

[1] Thompson D J. Rep. Prog. Phys. 2008, 71: 116901
[2] Hurley K, Dingus B L, Mukherjee R, et al. Nature 1994, 372: 652
[3] Tavani M., et al. A&A 2009, 502: 995
[4] Atwood W B, et al. ApJ 2009, 697: 1071
[5] Tavani M, et al. Science 2011, 331: 736
[6] Giuliani A, et al. ApJL 2011, 742: L30
[7] Ackermann M, et al. (*Fermi*-LAT collaboration). Science, 2013, 339: 807
[8] Hooper D, Goodenough L. Phys. Lett. B. 2011, 697: 412
[9] Zhou B, et al. Phys. Rev. D, 2015, 91: 123010
[10] Su M, Slatyer T R, Finkbeiner D P. Astrophys. J. 2010, 724: 1044
[11] Tavani M, et al. Nature 2009, 462: 620
[12] *Fermi*-LAT collaboration. Science 2015, 350: 801
[13] Aartsen M, et al. Science 2018, 361: 147
[14] Cui M Y, et al. Phys. Rev. Lett. 2017, 118: 191101
[15] Cuoco A, et al. Phys. Rev. Lett. 2017, 118: 191102
[16] Goldstein A, et al. Astrophys. J. Lett. 2017, 848: L14
[17] Abdo, A. A. et al. (*Fermi*-LAT collaboration) Nature 2009, 462: 331

[18] Chang J, et al. (DAMPE collaboration) Astropart. Phys. 2017, 95: 6
[19] Ambrosi G, et al, (DAMPE Collaboration) Nature 2017, 552: 63
[20] An Q, et al. (DAMPE Collaboration) Sci. Adv. 2019, 5: eaax3793
[21] Alemanno F, et al. (DAMPE Collaboration) Phys. Rev. Lett. 2021, 126: 201102
[22] Alemanno F, et al. (DAMPE Collaboration) Sci. Bull. 2022, 67(7): 679
[23] Ambrosi G, An Q, Asfandiyarov R, et al. (DAMPE collaboration) Astropart. Phys. 2019, 106: 18-34
[24] Yu Y, Sun Z, Su H, et al. Astropart. Phys. 2017, 94: 1-10
[25] 周勇,余玉洪,孙志宇,等,原子核物理评论, 2016,33:461-465
[26] Azzarello P, Ambrosi G, Asfandiyarov R, et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 2016, 831: 378
[27] Zhang Z, Zhang Y, Dong J, et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 2015, 780: 21
[28] 马思源, 封常青, 沈仲弢, 等. 核技术 2015, 38: 120403.
[29] 郭建华,蔡明生,胡一鸣,常进. 天文学报 2012,53(1):72
[30] Guo J H, Cai M S, Hu Y M, et al. ChA&A 2012, 36: 318.
[31] 谢明刚, 郭建华, 伍健, 常进. 天文学报 2014, 55(2): 170.
[32] Xie M G, Guo J H, Wu J, et al. ChA&A 2015, 39: 129.
[33] 张磊, 郭建华, 张永强. 天文学报 2014, 55(6): 522.
[34] Zhang L, Guo J H, Zhang Y Q. ChA&A 2015, 39: 380.
[35] Hu Y M, Chang J, Chen D Y, Guo J H, Zhang Y L, Feng C Q. Chin. Phys. C, 2016, 40: 116003.
[36] 徐遵磊, 张永强, 张哲, 藏京京, 张云龙, 郭建华, 蔡明生, 常进. 天文学报 2018, 59(3): 39.
[37] Xu Z L, Zhang Y Q, Zhang Z, et al. ChA&A 2019, 43: 114.
[38] 张永强,郭建华,韦家驹,张岩. 天文学报 2019, 60(6): 36
[39] Bergstrom L, Snellman H. Phys. Rev. D 1998, 37: 3737
[40] Bringmann T, et al. JCAP 2012, 07: 054
[41] Liang Y F, et al. Phys. Rev. D 2016, 93: 103525
[42] Ackermann M, et al. (*Fermi*-LAT Collaboration) Phys. Rev. D 2015, 91: 122002
[43] Yuan Q, Zhang B. JHEAp 2014, 3-4: 1
[44] Bartels R, et al. Phys. Rev. Lett. 2016, 116: 051102
[45] Li S, et al. Phys. Rev. D 2021, 104: 083037
[46] Geringer-Sameth A, et al. Phys. Rev. Lett. 2015, 115: 081101
[47] Li S, et al. Phys. Rev. D 2016, 93: 043518
[48] Ackermann M, et al. (*Fermi*-LAT Collaboration) Phys. Rev. Lett. 2015, 115: 231301
[49] Ando S, et al. 2020, Phys. Rev. D 102: 061302
[50] Liang Y F, et al. JCAP 2019, 06: 042
[51] Ajello M, et al. (*Fermi*-LAT Collaboration) Phys. Rev. Lett. 2016, 116: 161101
[52] Xia Z Q, et al. Phys. Rev. D 2018, 97: 063003
[53] Majumdar J, et al. JCAP 2018, 04: 048
[54] Abdollahi S, et al. (*Fermi*-LAT Collaboration) 2022, arXiv:2201.11184
[55] Cerruti M, et al. MNRAS 2015, 448: 910
[56] Kumar P, Zhang B. Phys. Rep. 2015, 561: 1
[57] MAGIC Collaboration. Nature 2019, 575: 455
[58] Abdollahi S, et al. Astrophys. J. Supp.S 2020, 33: 247
[59] Xing Y, Wang Z X. Astrophys. J. 2016, 143: 831
[60] Mirabel I F. Science 2012, 175: 335
[61] Abdo A A, et al. (*Fermi*-LAT Collaboration) Science, 2009, 326: 1512
[62] Li J, et al. Nature Astronomy 2020, 4: 1177
[63] Abeysekara A U, et al. Nature 2018, 82: 562
[64] Dubus G, Astron. Astrophys. Rev. 2013, 21: 64
[65] Dougherty S M, et al. Astrophys. J. 2005, 447: 623

[66] De Becker M, Raucq F. Astron. Astrophys. 2013, 558: 28
[67] Reimer A, Reimer O. Astrophys. J. 2009, 694: 1139
[68] Martí-Devesa G, Reimer O. Astron. Astrophys. 2021, 44: 654
[69] Pshirkov M S. MNRAS, 2016, 99: 457
[70] Yuan Q, et al. Astrophys. J. Lett. 2018, L18: 854
[71] Xi S Q, et al. Astrophys. J. Lett. 2020, L33: 896
[72] Fan Y Z, Zhang B, Wei D M. MNRAS 2004, 361: 965
[73] Levan A J, et al. Science 2011, 333: 6039
[74] Baade, W. & Zwicky, F. Proceedings of the National Academy of Science, 1934, 20: 259.
[75] Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M., et al. Astrophys. J.Supp.S, 2016, 224: 8.
[76] Ackermann, M., Ajello, M., Allafort, A., et al. Science, 2013, 339: 807.
[77] Zeng, H., Xin, Y., & Liu, S. Astrophys. J., 2019, 874: 50.
[78] Cao, Z., Aharonian, F. A., An, Q., et al. Nature, 2021, 594: 33.
[79] Lhaaso Collaboration, Cao, Z., Aharonian, F., et al. 2021, Science, 373: 425.
[80] Aharonian, F. A. & Atoyan, A. M. 1996, A&A, 309: 917
[81] Liu, R.-Y. & Wang, X.-Y. Astrophys. J., 2021, 922: 221.
[82] Cesarsky, C. J. & Montmerle, T. Space Science Reviews, 1983, 36: 173.
[83] Ackermann, M., Ajello, M., Allafort, A., et al. Science, 2011, 334: 1103.
[84] Aharonian, F., Yang, R., & de Oña Wilhelmi, E. Nature Astronomy, 2019, 3: 561.
[85] HESS Collaboration, Abramowski, A., Aharonian, F., et al. Nature, 2016, 531: 476.
[86] Huang, X., Yuan, Q., & Fan, Y.-Z. Nature Communications, 2021, 12: 6169.
[87] Finkbeiner, D. P. ApJ, 2004, 614: 186.
[88] Predehl, P., Sunyaev, R. A., Becker, W., et al. Nature, 2020, 588: 227.
[89] Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., et al. Astrophys. J., 2012, 750: 3.
[90] Ackermann, M., Ajello, M., Baldini, L., et al. Astrophys. J., 2011, 726: 81.
[91] Yang, R., Aharonian, F., & Evoli, C. Phys. Rev. D, 2016, 93: 123007.
[92] He, H.-N., Wang, T., Fan, Y.-Z., et al. Phys. Rev. D, 2013, 87: 063011.
[93] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., et al. Astrophys. J. Lett., 2018, 853: L29.
[94] Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M., et al. Astrophys. J.Supp.S, 2015, 218: 23.
[95] VERITAS Collaboration, Acciari, V. A., Aliu, E., et al. Nature, 2009, 462: 770.
[96] Acero, F., Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., et al. Science, 2009, 326: 1080.
[97] Ackermann, M., Ajello, M., Albert, A., et al. Astrophys. J., 2017, 836: 208.
[98] Ackermann, M., Albert, A., Atwood, W. B., et al. Astronomy & Astrophysics, 2016, 586: A71.
[99] Brunetti, G. & Jones, T. W. International Journal of Modern Physics D, 2014, 23: 1430007-98.
[100] Fang, K. & Murase, K. Nature Physics, 2018, 14: 396.
[101] Wei, J.-J. & Wu, X.-F. Frontiers of Physics, 2021, 16: 44300.
[102] Amelino-Camelia, G., Ellis, J., Mavromatos, N. E., et al. Nature, 1998, 393: 763.
[103] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 161101.
[104] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. Astrophys. J. Lett., 2017, 848: L12.
[105] *Fermi*-LAT collaboration, :, Abdollahi, S., et al. 2022, arXiv:2201.11184
[106] Roth, M.A., Krumholz, M.R., Crocker, R.M. et al. 2021, Nature, 597: 341–344
[107] Bertone, G., Hooper, D., & Silk, J. 2005, PhR, 405: 279
[108] Finke, J. D., Razzaque, S., Dermer, C. D. 2010, ApJ, 712: 238
[109] Domínguez, A.., Primack, J. R., Rosario, D. J., et al. 2011, MNRAS, 410: 2556
[110] DDomínguez, A., Finke, J. D., Prada, F., et al. 2013, ApJ, 770: 77
[111] The *Fermi*-LAT Collaboration. 2018, Science, 362: 1031
[112] Domínguez, A., Wojtak, R., Finke, J., et al. 2019, ApJ, 885: 137
[113] Zeng, H. & Yan, D. 2019, ApJ, 882: 87

[114] Plaga, R. 1995, Nature, 374: 430
[115] Aharonian, F. A., Coppi, P. S., & Volk, H. J. 1994, ApJL, 423: L5
[116] Dai, Z. G., Zhang, B., Gou, L. J., Meszaros, P., & Waxman, E. 2002, ApJ, 580: L7
[117] Dermer, C. D. et al., 2011, ApJL, 733: L21
[118] Neronov, A., Semikoz, D. V., Tinyakov, P. G., & Tkachev, I. I. 2011, A&A, 526: A90
[119] Tavecchio, F., Ghisellini, G., Bonnoli, G., et al., 2011, MNRAS, 414: 3566
[120] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, et al. NIMPA 2003, 506: 250-303.
[121] V. Schoenfelder,H. Aarts, K. Bennett, et al. ApJS 1993, 86: 657
[122] Shen Z Q, Xia Z Q, Fan Y Z. ApJ 2021, 920: 1
[123] Moiseev A. 2019, 36th International Cosmic Ray Conference -ICRC2019, 1177
[124] Zober W, 2021, 43rd COSPAR Scientific Assembly, 1370
[125] Zhang S N, et al. (HERD collaboration) Proc. SPIE 2014, 9144: 91440X
[126] Liao N H, Li S, Fan Y Z. ApJL 2018, 865: L17

Very Large Area Gamma-ray Space Telescope (VLAST)

FAN Yi-Zhong[1,2,3] CHANG Jin[1,2,3,8] GUO Jian-Hua[1,2,3] YUAN Qiang[1,2,3] HU Yi-Ming[1,2] LI Xiang[1,2] YUE Chuan[1,2] HUANG Guang-Shun[4,5] LIU Shu-Bin[4,5] FENG Chang-Qin[4,5] ZHANG Yun-Long[4,5] WEI Yi-Feng[4,5] SUN Zhi-Yu[6] YU Yu-Hong[6] KONG Jie[6] ZHAO Cheng-Xin[g] ZANG Jin-Jin[7] JIANG Wei[1,2] PAN Xu[1,2,3] WEI Jia-Ju[1,2] WANG Shen[1,2] DUAN Kai-Kai[1,2] SHEN Zhao-Qiang[1,2] XIA Zhi-Qing[1,2] XU Zun-Lei[1,2] FENG Lei[1,2,3] HUANG Xiao-Yuan[1,2,3] Tsai Yue-Lin Sming[1,2] WEI Jun-Jie[1,3] ZENG Hou-Dun[1,2] HE Hao-Ning[1,2] LI Jian[3] YANG Rui-Zhi[3] YAN Jing-Zhi[1,2,3] ZHANG Yi[1,2,3] WU Xue-Feng[1,2,3] WEI Da-Ming[1,2,3]

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210023)
(2 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210023)
(3 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026)
(4 State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026)
(5 Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026)
(6 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Nanchang Road 509, Lanzhou, Gansu 730000)
(7 School of Physics and Electronic Engineering, Linyi University, Linyi, Shandong 276000)
(8 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract High energy gamma-rays carry the fundamental information of the astrophysical sources in extreme conditions. The space detection of gamma-rays is distinguished by the wide energy range, the observation continuity as well as the high energy resolution. With the experience in constructing and running the DArk Matter Particle Explorer (DAMPE), we propose a new satellite mission——Very Large Area gamma-ray Space Telescope (VLAST). VLAST has an acceptance of $\sim 10\ \mathrm{m}^2$ sr at GeV energies and $\sim 1\ \mathrm{m}^2$ sr at MeV energies. Together with a much better energy resolution, VLAST is expected to increase the sensitivity of *Fermi* Large Area Telescope by a factor of 10. In this work, the main scientific objectives, the detection principle, the payload and the expected performance of VLAST are introduced.

Key words Instrumentation: detectors, Gamma rays: general, Radiation mechanisms: non-thermal, Astroparticle physics